

眼球型ディスプレイによる視線方向提示手法の開発

河野大器^{†1} 大槻麻衣^{†1} 葛岡英明^{†1} 鈴木雄介^{†2}

概要：映像通信を利用した遠隔対話において、平面に映し出された遠隔対話者の映像から視線方向を正確に読み取るのは困難であることが示されている。本研究ではこの問題を解決するために、人間の眼球を模した半球状の眼球型ディスプレイを開発した。このディスプレイ上で黒目の表示位置を変化させることで、眼球が回転しているように見せ、人間の眼球に近い精度で視線を提示することが可能であると考えられる。さらに、開発したディスプレイの視線方向提示精度を実験によって確認したので報告する。

1. はじめに

人と人の対話では視線の重要性が指摘されており[1, 2, 3], 相手の視線方向を正確に読み取ることは円滑な対話を行う上で重要である。遠隔対話においても視線方向を正確に伝達する必要があるが、ビデオ会議のように平面のディスプレイに映し出された顔の映像からは正確に視線を読み取ることができず、対話に齟齬が生じることが知られている[4]。この問題を解決する手法として、テレプレゼンスロボット[5, 6]が注目されている。遠隔対話者の顔が表示されたディスプレイをロボットの頭部とし、遠隔対話者の頭部動作とロボットの頭部動作を同期させることで視線方向を提示している。しかし、ディスプレイが回転すると同時にそこに表示される顔の映像も回転することで視線方向が誤って知覚されてしまい、これを解決することが課題となっている。しかし、回転するディスプレイでは注視方向を正確に提示できないことが示されている[7]。一方、顔型スクリーンとパン・チルト機構を組み合わせた手法も提案されている[8, 9]。顔型スクリーンを立体形状にすることで、視線方向の明確化とモノリザ効果[10]の抑制に成功している。しかし、顔の型取りを行って成形するため、個人専用になり汎用性に乏しい。

本研究では、視線方向を正確に提示でき、かつ、汎用的に使用できる手法の開発を目的とする。平面のディスプレイでは視線方向を伝えることができないため、立体形状が必要である。また、汎用性を持たせるためには顔のように個人差の大きいものは利用できない。そこで本研究では、人の眼球を模した眼球型ディスプレイを提案する。

2. 関連研究

2.1 平面ディスプレイの回転による視線方向提示

Adalgeirsson ら[5]は、パン・チルトおよび前後動作が可能な可動式ディスプレイ(頭部)と、3自由度の腕を有するMeBotを開発した。MeBotは、操作者の顔画像から画像処理によって注視方向を検出し、ロボットの頭部を操作する。Kawanobe ら[6]は、パン・チルトおよび前後動作が可能な

可動式ディスプレイ(頭部)と、プロジェクタによる指差し映像の伝達機能を有するiRISを開発した。iRISもMeBotと同様に操作者の頭の動きに連動してロボットの頭部が動作するようになっている。これらの研究では、ロボットのディスプレイの向きによって操作者の視線方向を提示しているが、ディスプレイの回転とそこに映し出される顔の回転が合わさり、視線方向が誤って知覚されてしまう。

Kawaguchi ら[7]は、顔画像そのものの回転角度と、それを表示するディスプレイの回転角度を様々に変更して評価を行い、全ての条件で知覚される注視方向に誤差が生じることを明らかにした。このことから、ディスプレイの回転により視線方向を正確に提示するのは困難であると考えられる。

2.2 立体形状による視線方向提示

Misawa ら[8]は、話者映像提示を行う立体顔形状スクリーンとパン・チルト・ロール動作が可能なロボットの組み合わせにより、話者の視線方向を物理的に提示し、視線方向の明確化とモノリザ効果の抑制に成功している。しかし、顔スクリーンを成形するのに顔の型取りが必要であり、個人専用になるため汎用性に乏しい。また、視線方向を顔全体の向きだけで示しており、顔スクリーンに映る眼球動作による注視方向提示については言及していない。

Delaunay ら[9]は、立体的な顔型スクリーンにアニメーションの顔を投影して視線方向を提示している。この顔型スクリーンは人の顔を模して成形したものであるが、実際の人の顔から型取りは行っていない。また、眼球動作による視線提示精度も評価しているものの、対面(実際に人間と向き合う)、平面ディスプレイ、ドーム型スクリーンと比較して有意に提示精度が高いとは言えなかった。

岡島ら[11]は、左右の目と瞼が独立に動く眼球ロボットを、平面のスクリーンに投影された遠隔対話者の目の部分にはめ込んだシステムを開発し、社会的テレプレゼンスに対する影響を調べた。しかし、視線方向提示精度の評価は行っていない。

^{†1} 筑波大学

University of Tsukuba.

^{†2} 沖電気工業株式会社 研究開発センタ

Oki Electric Industry Co.,Ltd. Corporae Reseach and Development Center

2.3 本研究の位置づけ

2.1 節で述べたように、平面のディスプレイで視線方向を正確に提示することは困難である。また、2.2 節で述べたように、顔型スクリーンは個人専用になってしまう。

我々は、従来のビデオ会議に、視線方向を示す立体的なインジケータを加えることで、これらの問題を解決できるのではないかと考えた。そこで本研究では、視線方向のインジケータとして、人の眼球を模した眼球型ディスプレイを開発し、その視線提示精度を調べた。

3. 眼球型ディスプレイ

眼球型ディスプレイの外観を図 1 に示す。眼球型ディスプレイは Ficon[12]の製法を参考に、光ファイバを樹脂で固め、切削して曲面を成形した。仕様を表 1 に示す。

眼球型ディスプレイは底面から入射した光が曲面上に浮き上がって見える。本研究では眼球型ディスプレイを置いた液晶ディスプレイ(以後、LCD)上に黒い円を描画し、その描画位置を変化させることで眼球が回転しているかのように見せる。描画する黒目の直径は、人の眼球直径と虹彩直径の比に合わせた。

しかし、LCD 上に真円を描いても、眼球型ディスプレイの曲面上では歪んでしまう。そこで、曲面上における黒目の中心から端までの幅が均等になるように、描画する黒目の形を楕円状に補正した(図 3)。黒目が眼球型ディスプレイの正面にある時の黒目中央から端までの角度が θ_i 、眼球型ディスプレイの曲率半径が R のとき、補正後の円の径 r_1+r_2 は、提示角度 θ とその時の黒目中心座標 c の関数として次式で表される。

$$r_1 = c - R \sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{c}{R} \right) - \theta_i \right) \quad (1)$$

$$r_2 = R \sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{c}{R} \right) + \theta_i \right) - c \quad (2)$$

また、眼球型ディスプレイは光ファイバの束であるため光の直進性が強く、観察する位置が正面からずれると著しく視認性が低下する。これを解消するために、表面に光拡散剤を塗布した。

4. 実験

4.1 概要

眼球型ディスプレイで視線方向を提示するにあたり、提示視線角度と黒目の描画位置の関係を定める必要がある。そこで、黒目の描画位置と眼球の回転を対応付けて図 4 および(3)式のように提示角度を定めた。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{c}{R} \quad (3)$$

しかし、意図したように視線角度を知覚することができなかった。

そこで、実験 1 で黒目の描画位置と知覚される視線角

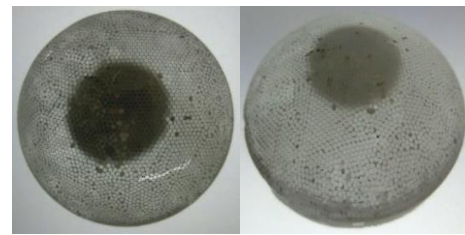


図 1. 眼球型ディスプレイの外観

表 1. 眼球型ディスプレイの仕様(単位は mm)

直径	32
高さ	11
曲率半径	17.14
光ファイバ直径	0.5

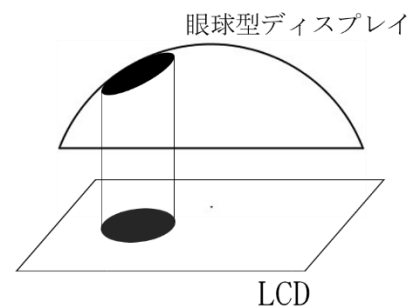


図 2. LCD による黒目の表示

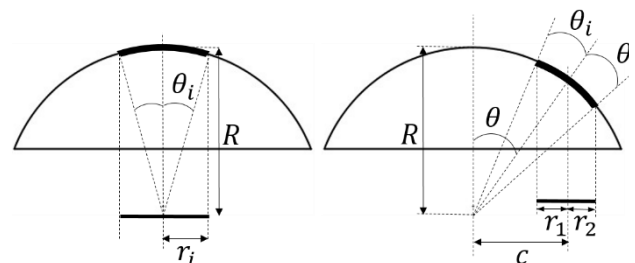


図 3. 黒目の歪み補正

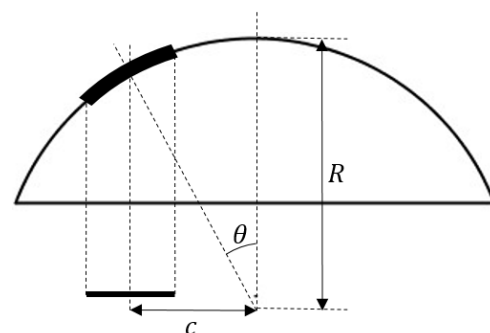


図 4. 眼球型ディスプレイの提示角度

度の関係を求め、実験 2 で提示精度の評価と人の顔および平面 LCD に表示された顔画像との比較を行った。

4.2 実験 1 近似式決定

実験環境を図 5 に示す。被験者に、眼球型ディスプレイ

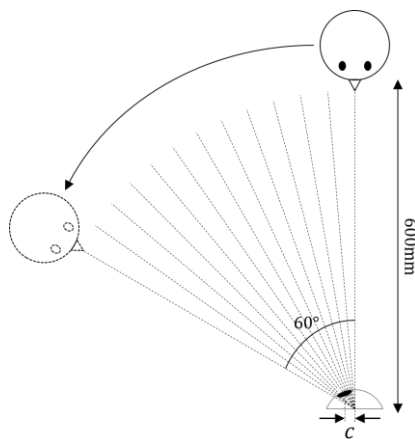


図 5. 実験 1 の実験環境

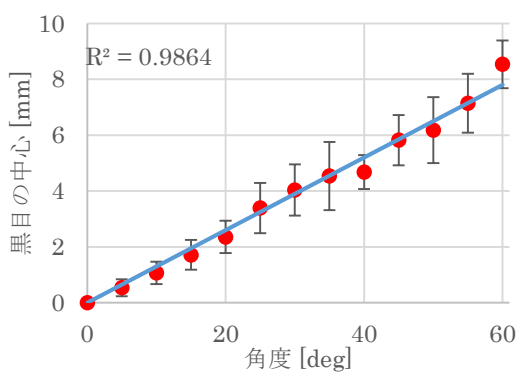


図 6. 実験結果 1

を中心とし水平方向に 0 [deg] から 60 [deg] までの間を 5 [deg] 刻みに移動させた。それぞれの角度で目が合うと思う位置に眼球型ディスプレイの黒目部分を水平方向に動かかし、そのときの LCD 上での黒目中心座標 c を記録した。眼球型ディスプレイと被験者の目は顎乗せ台を用いて同じ高さに合わせた。使用した LCD は I-O DATA 社製 LCD-AD221FB-T-A で、実測値から 1 ピクセルのサイズを 0.25 [mm] とした。

被験者は正常な視力を有する大学生、大学院生 8 名(全員男性)であった。

実験により得られたデータを図 6 に示す。回帰分析を行った結果、(4)式の近似式を得た。

$$c = 0.1301 \theta \quad (4)$$

決定係数が 0.9864 と十分 1 に近いので、得られた近似式は当てはまりが良いと言える。実験 2 ではこの近似式を用いて、提示したい角度 θ から、それを実現する黒目の描画位置 c を定めることとする。ここで得られた水平方向の結果は、垂直方向にも適用する。

4.3 実験 2 提示精度測定

製作した眼球型ディスプレイの視線提示精度を評価するための実験を行った。被験者は正常な視力を有する大学生、大学院生 6 名(全員男性)であった。

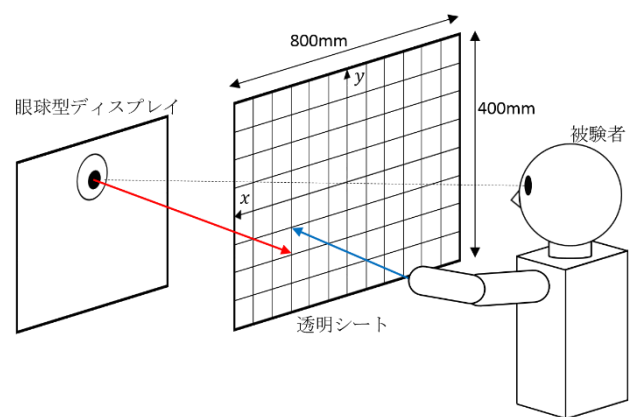
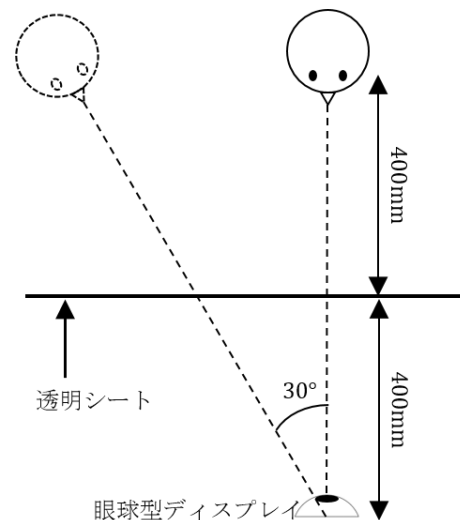


図 7. 実験 2 の実験環境

4.3.1 実験条件

以下の提示手法 3 種類の比較を行った。

1. 眼球型ディスプレイ(提案手法) : LCD (実験 1 と同一) に黒目を描画し、眼球型ディスプレイを LCD 上に固定した。黒目の描画位置は実験 1 によって得られた式 (2) を用いて定めた。
2. 対面 : 実験者が提示点を直接注視した。顎乗せ台を使用して目の位置を固定した。
3. 顔画像 : 事前に実験者が提示点を注視しているときの顔画像を撮影しておき、実際の実験者の顔とほぼ同じ大きさになるように拡大し、LCD に表示した。

いずれの条件についても顎乗せ台を使用し、被験者の目の位置と、眼球型ディスプレイ、実験者、LCD 上の顔画像の目の高さが等しくなるように固定した。さらに、以上の 3 条件に加え、観察位置を正面(0 [deg])と斜め(30 [deg])の 2 条件用意した。

4.3.2 実験環境

実験環境を図 7 に示す。被験者は眼球型ディスプレイ正面 80[cm] の位置に座り、被験者とディスプレイの間に格子を描いた透明なシートを設置した。透明シートのサイズは縦 40 [cm]、横 80 [cm] で、1 [cm] 間隔に格子を描いた。



図 8. ディスプレイ条件

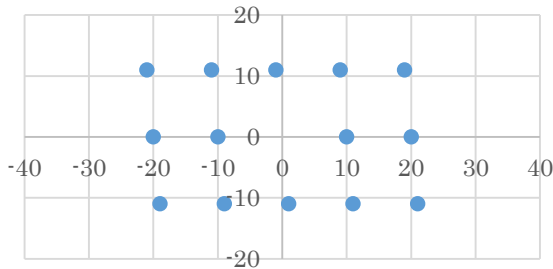


図 9. 提示した注視点

4.3.3 実験タスク

被験者は指示された観察位置(正面, 斜め)に移動して目を閉じ, 合図をされてから目を開けて透明シート上にディスプレイが見ていると思う点をペンでプロットする. 以後, ディスプレイが見ている点を「提示点」, 被験者がシートにプロットした点を「回答点」と呼称する.

提示する点は図 9 に示した 14 箇所, 観察角度と提示点の順序は試行毎にランダムにした. 被験者 1 人あたりの試行回数は提示手法 3 種類 × 提示点 14 箇所 × 観察位置 2 箇所の計 84 回であった.

4.3.4 実験結果

ディスプレイ側から見て右を x 軸正方向, 上を y 軸正方向とし, 提示点から回答点への誤差ベクトルの大きさ, x 軸成分, y 軸成分, 1 試行当りの回答時間を求めた. それぞれの結果について, ディスプレイ(3 水準)と観察位置(2 水準)を要因として, 2 要因分散分析を行った.

誤差ベクトルの大きさの平均値を図 10 に示す. 分散分析の結果, ディスプレイと観察位置について主効果が有意であった(それぞれ, $F(2, 10)=10.236, p<0.001$; $F(1, 5)=12.405, p<0.05$). また, ディスプレイと観察位置の交互作用が有意であった($F(2, 10)=6.697, p<0.05$). そこで, 下位検定として観察位置毎にディスプレイ間の単純主効果の検定および多重比較を行った. その結果, 正面位置においてディスプレイ間に有意差は見られなかったが, 斜め位置においては顔画像条件の誤差が眼球型ディスプレイ条件, 対面条件よりも有意に大きかった. また, 顔画像条件において, 正面位置よりも斜め位置の場合に, 有意に誤差が大きくなった.

水平方向の誤差の平均値を図 11 に示す. 分散分析の結果, ディスプレイの主効果が有意であった($F(2, 10)=10.976, p<0.01$). また, ディスプレイと観察位置の交互作用が有意

であった($F(2, 10)=14.172, p<0.001$). そこで, 下位検定として観察位置毎にディスプレイ間の単純主効果の検定および多重比較を行った. その結果, 斜め位置において顔画像条件の誤差が眼球型ディスプレイ条件, 対面条件よりも有意に大きかった.

垂直方向の誤差の平均値を図 12 に示す. 分散分析の結果, ディスプレイの主効果が有意であった($F(2, 10)=12.561, p<0.01$). ディスプレイと観察位置の交互作用は認められなかった. そこで, 下位検定としてディスプレイの多重比較を行った. その結果, 対面条件と眼球型ディスプレイ条件の間に有意差が, 眼球型ディスプレイ条件と顔画像条件の間に有意傾向が見られた.

1 試行当りの回答時間の平均を図 13 に示す. 分散分析の結果, 観察位置の主効果が有意であった($F(1, 5)=6.600, p<0.050$). ディスプレイの主効果は見られなかった. そこで, 下位検定として観察位置の多重比較を行った. その結果, 正面位置よりも斜め位置の方が, 有意に回答時間が長くなった. 平均回答時間の差は 0.686 [s]であった.

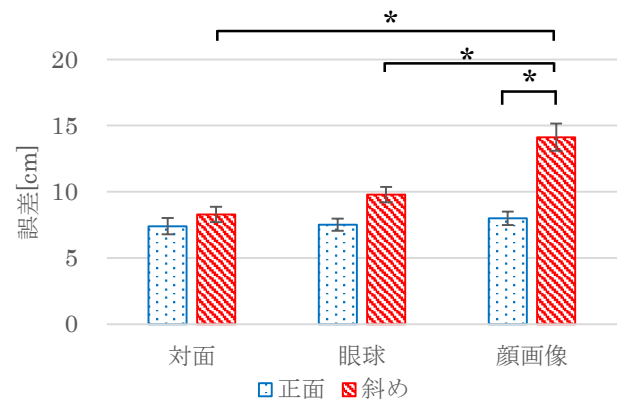


図 10. 誤差ベクトルの大きさ
(** : $p<0.01$, * : $p<0.05$, + : $p<0.1$)

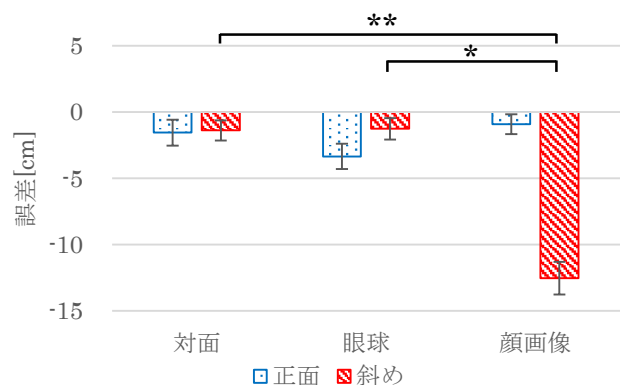


図 11. 誤差の大きさ(水平方向)
(** : $p<0.01$, * : $p<0.05$, + : $p<0.1$)

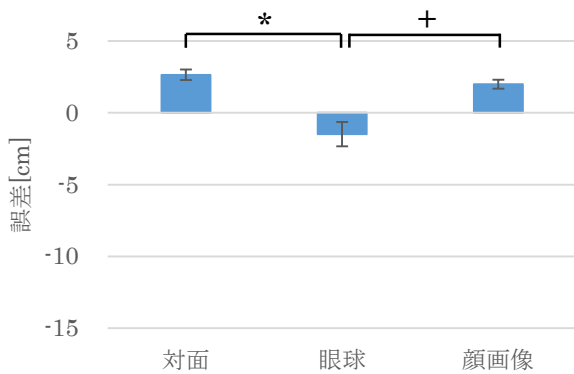


図 12. 誤差の大きさ(垂直方向)
(** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$, + : $p < 0.1$)

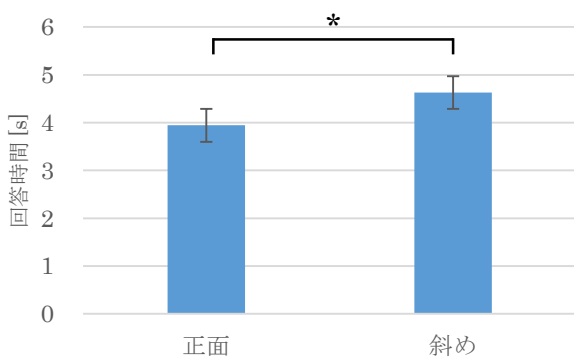


図 13. 回答時間(** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$, + : $p < 0.1$)

4.3.5 考察

誤差ベクトルの大きさについては、顔画像条件の斜め位置で誤差が増大しているが、眼球型ディスプレイ条件、対面条件では観察位置による有意差は見られない。これは、平面ディスプレイに表示された顔画像から正確に視線を読み取れないのに対し、眼球型ディスプレイ・対面では立体形状であるために、斜めからの視認性が向上し、誤差が減少したものと考えられる。

水平方向の誤差は、顔画像条件の斜め位置で負方向に大きな誤差が生じている。これはモナリザ効果[10]によるものと考えられる。平面顔画像はどの位置から見ても目が合っているように感じてしまうため、被験者が自分のいる方(x軸負方向)に視線を知覚してしまったものと考えられる。一方、眼球型ディスプレイ条件では、観察位置による誤差の変化は見られないため、モナリザ効果の抑制に成功したと言える。

垂直方向の誤差については、対面条件・顔画像条件では誤差の平均値が正であるのに対し、眼球型ディスプレイ条件では負の値になっている。これは顔の有無によって生じていると考えられる。対面条件・顔画像条件では視線が上下に動くと黒目の一部が顔に隠れる。人の顔は上下非対称で、下を見る時よりも上を見る時の方が黒目の露出面積が

少ないのに対し、眼球型ディスプレイでは常に同じ面積が露出している。そのため、黒目のy軸方向の変位が同じであっても、対面条件・顔画像条件では上方の視線角度が実際よりも大きく知覚されて正の誤差が、一方、眼球型ディスプレイ条件では上方の視線角度が実際よりも小さく知覚されて負の誤差が生じていると考えられる。

1 試行あたりの平均回答時間は、正面位置よりも斜め位置の方が長くなっており、視線の読み取りに迷いが生じていると考えられる。一方、ディスプレイ条件間には有意差が見られず、回答時間の平均値もほぼ等しい。このことから、眼球型ディスプレイの視線の読み取り易さは、対面条件や顔画像条件とほとんど変わらないと言える。

5. おわりに

本研究では、遠隔対話者の視線を正確に提示するためのインジケータとして、眼球型ディスプレイを開発し、その視線方向提示精度を調べた。その結果、顔画像を斜めから見たときに生じるモナリザ効果が、眼球型ディスプレイでは抑制されることが分かった。また、視線の読み取り易さも、対面条件・顔画像条件とほとんど変わらないことを確認した。

今後は、視線提示精度の向上を図るために、垂直方向の視線提示角度に関する実験1と同様の実験を行い、近似式を求める必要がある。また、顔の有無や形状が、視線提示精度に与える影響も調べる必要がある。さらに、実際の遠隔対話に組み込み、眼球型ディスプレイが遠隔対話に与える影響についても調査することを予定している。

参考文献

- 1) A. Kendon, "Some Functions of Gaze-direction in Social Interaction", *Acta Psychologica* 26, pp. 22-63 (1967)
- 2) C. Goodwin, "Goodwin, Professional vision", *American anthropologist*, 96, 3, pp. 606-633 (1994)
- 3) H. Ishii, M. Kobayashi, J. Grudin, "Integration of interpersonal space and shared workspace: ClearBoard Design and Experiments", *ACM transactions on Information Systems*, Vol. 11, No. 4, pp. 349-375 (1993)
- 4) C. Heath, P. Luff, "Disembodied conduct; communication through video in a multi-media office environment", In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, ACM pp.35-54 (1991)
- 5) S. Adalgeirsson, C. Breazeal, "MeBot: A Robotic Platform for Socially Embodied Telepresence", In *Proceedings of the 5th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*. IEEE Press, pp. 15-22 (2010)
- 6) H. Kawanobe, Y. Aosaki, H. Kuzuoka, Y. Suzuki, "iRIS: A Remote surrogate for mutual reference", In *Proceedings of the 8th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*. IEEE Press, pp. 403-404 (2013)
- 7) I. Kawaguchi, H. Kuzuoka, Y. Suzuki, "Study on gaze direction perception of face image displayed on rotatable flat display", *CHI'2015 Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1729-1737 (2015)
- 8) K. Misawa, Y. Ishiguro, J. Rekimono, "LiveMask : A Telepresence surrogate system with a face-shaped screen for supporting nonverbal

- communication”, 情報処理学会インタラクシオン 2012, pp. 41-48 (2012)
- 9) F. Delaunay, J.D. Greeff, T. Belpaeme, “Retro-Projected Robotic Face and its effectiveness for gaze reading by humans”, Proceedings of the 5th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, pp. 39-44 (2010)
- 10) J. Edlund, S.A. Moubayed, J. Beskow, “The Mona Lisa Gaze Effect as Objective Metric for Perceived Cospatality”, Intelligent Virtual Agents 2011, Volume 6895 of the series Lectures Notes in Computer Science, pp.439-440 (2011)
- 11) 岡島智也, 田中一晶, 中西英之, “眼球ロボットにより視線を提示するスクリーンの開発”, 人工知能学会全国大会論文集 28, pp. 1-4 (2014)
- 12) 高田悠太, 中林隆介, 福地健太郎, ”Ficon: 立体映像表示が可能なタンジブルデバイスの提案”, 情報処理学会インタラクシオン 2014, pp. 100-107 (2014)